

REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA SOBRE SIMULADORES SOLARES PARA APLICAÇÕES EM ENERGIA FOTOVOLTAICA

Alexandre Teodoro Alves Moreira – alexandreteodoro@discente.ufg.br

Enes Gonçalves Marra

Universidade Federal de Goiás (UFG) – Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC)

Resumo. Este texto apresenta uma revisão sistemática da literatura (RSL) executada com o auxílio do software StArt, para a tecnologia de simuladores solares com grandes áreas (áreas maiores que 256 cm^2) e de fluxo não-concentrado (próximos a 1.000 W/m^2) nos últimos vinte anos. Os simuladores solares pesquisados foram aqueles que fossem baseados em lâmpadas de xenônio, halogenadas, haleta metálico ou LEDs como fonte exclusiva de irradiância. As buscas para a RSL foram realizadas nas bases de dados IEEE Xplore, Scielo, Science Direct, Scopus, Web of Science, Google Scholar e o repositório da CAPES, enquanto para publicações brasileiras foi realizada também busca na BDTD (Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações). Como resultado da RSL foram encontrados trinta e oito artigos que corresponderam aos critérios de busca. Em seguida, foi realizada a análise bibliométrica dos dez artigos mais citados, indicando a distribuição das publicações ao longo dos anos, o número de publicações de acordo com o país de origem da instituição dos autores e o número de artigos por tipo de lâmpada. Oito dos artigos mais citados na literatura e selecionados pela RSL foram brevemente resumidos sendo apresentados alguns aspectos de destaque no que diz respeito ao projeto dos simuladores solares, tais como: importância da escolha da fonte de irradiância adequada, impacto da geometria na construção do simulador e na distribuição das lâmpadas no plano irradiante, importância do controle de temperatura da fonte de irradiância, estratégias de otimização da irradiância na câmara interna com o uso de materiais refletores, uso de softwares de simulação óptica para otimização construtiva do simulador e a classificação dos simuladores de acordo com as normas internacionais de desempenho de simuladores solares.

Palavras-chave: Simulador Solar, Revisão Sistemática da Literatura, Energia Solar Fotovoltaica.

1. INTRODUÇÃO

Os simuladores solares são equipamentos que possuem o objetivo de simular as mesmas características da fonte luminosa proveniente do sol da forma mais próxima possível da fonte natural, com a vantagem de que os parâmetros como irradiância e temperatura podem ser adequadamente controlados.

A aplicabilidade desse equipamento é ampla, sendo alguns dos principais campos de uso aqueles que estudam a fotodegradação e a fotocatalização química, estudos na área médica principalmente na dermatologia, na biologia para estudo de organismos diretamente afetados pelo sol como plantas e algas, estudos de máquinas térmicas como por exemplo motores *Stirling*, estudos de coletores térmicos solares e o uso para estudo de módulos fotovoltaicos em relação às mais diversas aplicações, que é o escopo deste trabalho (Salam *et al.*, 2016).

As características dos simuladores são determinadas pelos requisitos dos ensaios a serem realizados. Por exemplo, para testes em que o tempo é um fator importante para o ensaio (ensaio de estabilização, efeito da temperatura no módulo FV etc.), recomenda-se o simulador solar contínuo (Costa *et al.*, 2018); já para testes para caracterização da curva I-V do módulo, recomendam-se os simuladores solares pulsados (mono ou multipulso), apesar de possuírem a necessidade do controle de medição dos dados mais sofisticado, rápido e preciso.

A norma IEC 60904-9 (2007) estabelece que os três principais componentes de um simulador solar são a fonte de luz associada ao suprimento de energia, filtro óptico para o condicionamento da radiação luminosa e os sistemas de controle e aquisição de dados. A norma classifica os simuladores solares de acordo com a operação durante um ciclo de teste em contínuo (*steady state*), multipulsos (*multi flash*) e monopulso (*single flash*).

Quanto ao desempenho e à qualidade dos simuladores solares, a norma IEC 60904-9 classifica os simuladores em três classes, divididas em A, B e C, sendo que A representa a classe de padrão mais elevado e C representa o padrão menos rigoroso quanto ao desempenho. Os três principais aspectos do simulador que influenciam diretamente no desempenho são a correspondência espectral da fonte de luz utilizada no simulador, isso é, o quanto o espectro de irradiância da fonte se assemelha à distribuição espectral solar natural; a não-uniformidade da irradiância, que diz respeito à qualidade da distribuição da luminosidade no plano de testes; e a instabilidade temporal da fonte de irradiância, que mede o quanto a fonte de luz consegue manter os parâmetros da irradiância estáveis durante o período de realização dos testes.

A Tab. 1 apresenta o resumo dos diferentes parâmetros de classificação dos simuladores solares e os valores limites desses parâmetros para cada classe específica.

Tabela 1 – Classificação dos simuladores solares de acordo com a IEC 60904-9.

| Classificação | Casamento Espectral | Não-Uniformidade da Irradiância | Instabilidade Temporal | |
|---------------|---------------------|---------------------------------|------------------------|-------|
| | | | Curta | Longa |
| A | 0,75 - 1,25 | 2% | 0,50% | 2% |
| B | 0,6 - 1,4 | 5% | 2% | 5% |
| C | 0,4 - 2,0 | 10% | 10% | 10% |

2. BASE TEÓRICA

A energia solar é uma forma de radiação eletromagnética emitida pelo Sol composta por diferentes frequências de ondas eletromagnéticas, com faixas específicas de comprimento de onda e energia associados. As ondas eletromagnéticas da energia solar são emitidas na forma corpuscular de fótons, possuindo sempre frequência e comprimento de onda característicos. A Eq. (1) descreve a relação da energia emitida pelos fótons em função do comprimento de onda, sendo h a constante de Planck, c a velocidade da luz no vácuo e λ o comprimento de onda do fóton emitido em uma dada frequência. A dependência direta entre a energia dos fótons e o comprimento de onda é particularmente importante nos simuladores solares, pois indica a importância da escolha da fonte de irradiância utilizada.

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (1)$$

A maior parte da energia solar que chega à Terra está na faixa de frequências da luz visível e da luz infravermelha próxima e uma pequena parcela de raios ultravioleta. Ao atingir a atmosfera terrestre, parte da irradiância é refletida de volta para o espaço, majoritariamente o conteúdo na frequência ultravioleta, enquanto outra parte é absorvida pela superfície da Terra. A caracterização do espectro da irradiância incidente na Terra é determinada pelo percurso na atmosfera terrestre, sendo AM0 (*Air Mass 0*, ou seja, massa de ar zero) o espectro solar antes dos raios penetrarem na atmosfera, ou seja, no topo da atmosfera; AM1,0 é o espectro correspondente a uma atmosfera, correspondente ao sol com incidência normal à superfície de captação, ou seja, com ângulo zenital zero; os raios solares que atravessam uma e meia atmosfera até a superfície de captação, com ângulo zenital de aproximadamente 48,2°, é definido como AM1,5.

A Fig. 1 ilustra as diferentes correspondências espectrais de acordo com o ângulo de incidência na superfície de captação.

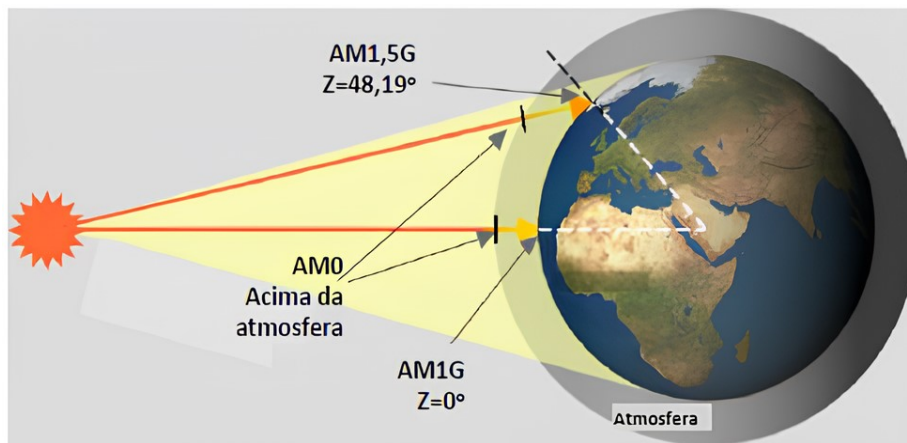


Figura 1 – Ilustração dos diferentes referenciais de espectro de irradiância terrestre. Fonte: (Innocente e Boniatti, 2020).

A irradiância solar global (G) é definida como a densidade superficial de potência luminosa incidente por unidade de área em W/m^2 , sendo fortemente influenciada pela atmosfera terrestre que atua na dispersão, reflexão e absorção pelos gases e vapores que compõem a atmosfera, principalmente O_3 , H_2O , O_2 e CO_2 . Essa filtragem atenua o espectro solar incidente na atmosfera em vários comprimentos de onda e o espectro resultante depende do índice AM. O índice AM1,5 é o padrão nos ensaios de módulos fotovoltaicos de uso terrestre, definido em algumas normas internacionais, por exemplo a IEC 60904-3 e a ASTM G173.

A Fig. 2 ilustra a distribuição espectral de irradiância solar citados, de acordo com a norma ASTM G173.

Em relação aos simuladores solares, os ensaios são geralmente padronizados para as condições STC (*Standard Test Conditions*), que além do espectro padrão de irradiância AM1,5, definem também a temperatura de 25°C na junção PN da célula de silício e a irradiância padrão de 1.000 W/m^2 . O valor de 1.000 W/m^2 é também denominado 1 Sol ou 1 *Sun* ou 1 Sol Padrão ou 1 Sol Pleno.

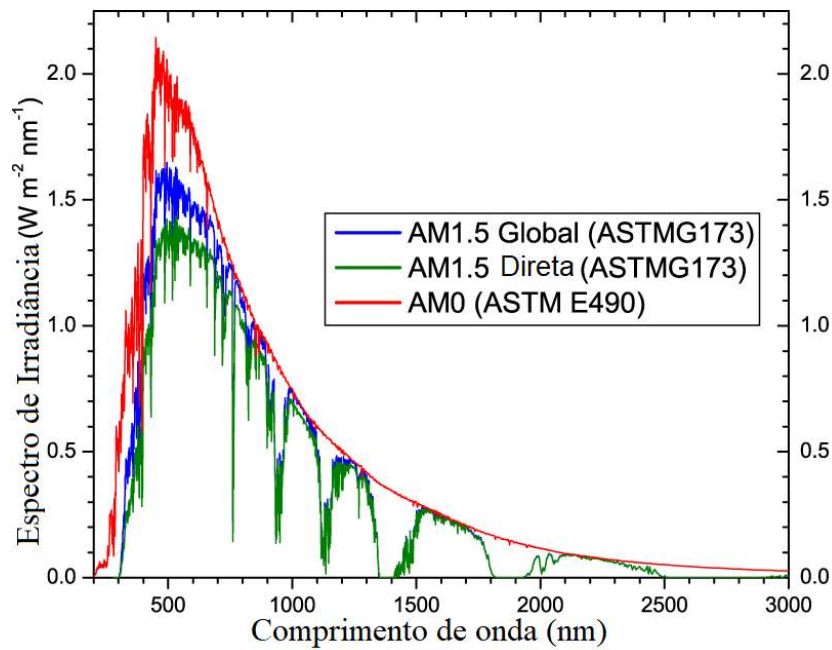


Figura 2 – Diferentes referenciais de espectro de irradiância terrestre. Fonte: adaptado de Pei (2017).

3. METODOLOGIA

O trabalho aqui apresentado tem como recorte temporal os artigos publicados a partir do ano 2003 até os dias atuais. O período foi escolhido para contemplar adequadamente artigos de simuladores solares tanto com fontes de luz já consolidadas quanto os de lâmpadas de xenônio e de fontes de luz que ainda estão sendo exploradas para simuladores, como por exemplo os LEDs. Os artigos selecionados foram aqueles que apresentaram as especificações de dimensões, tipo de fonte de luz, controle de irradiância e temperatura para a construção de simuladores ou para a avaliação de simuladores prontos. Artigos que utilizaram o simulador como ferramenta de aplicação, não tendo o simulador em si como foco do trabalho, não foram selecionados para a análise final.

Quanto ao aspecto técnico, a revisão bibliográfica teve como foco artigos que esboçaram a construção de simuladores solares de grande área e baixo fluxo. Não há na literatura uma definição consensual das características que definem os simuladores por fluxo e área. No escopo deste trabalho, o termo “baixo fluxo” (*low flux* ou *low irradiance*) refere-se aos simuladores com irradiância de operação em torno de 1.000 W/m^2 ou com valores de irradiância próximos ao valor do padrão STC. O termo “baixo fluxo” é utilizado principalmente para distinguir os simuladores de “alto fluxo” que utilizam uma ou várias fontes de irradiância combinadas com aparatos ópticos como lentes, refletores, filtros ópticos e outras técnicas para produzir irradiâncias concentradas em pequenas áreas, com valores que ultrapassem 1 Sol e atinja altas temperaturas. Os simuladores solares de alto fluxo geralmente são empregados em estudos de reações termoquímicas, em ensaios de células fotovoltaicas multijunção, na produção de combustíveis solares e na simulação de sistemas heliotérmicos (Ekman *et al.*, 2015).

Quanto à dimensão, há trabalhos que classificam como grande área (*large area*), simuladores com áreas acima de 900 cm^2 (Al-Ahmad, 2019), enquanto outros consideram áreas maiores que 1 m^2 (Watjanatepin *et al.*, 2019), indicando que não há um padrão comum na literatura para essa definição. No escopo deste trabalho, será considerado um simulador de grande área aquele que possuir uma área de testes irradiada com dimensões iguais ou superiores a uma célula de silício fotovoltaica comercial, ou seja, uma área igual ou superior aos $15,6 \text{ cm} \times 15,6 \text{ cm}$ ($\approx 256 \text{ cm}^2$). Outro critério utilizado é o tipo da fonte de irradiância dos simuladores, sendo aqui eleitos os simuladores com lâmpadas incandescentes ou halogenadas, lâmpadas de xenônio, lâmpadas de haleto metálico e LEDs. Simuladores solares com fontes mistas de irradiância, fruto da combinação de dois ou mais tipos de lâmpadas, foram descartados, tendo-se em conta que um dos objetivos da revisão é avaliar o desempenho individual das fontes escolhidas quanto à reprodução das condições de irradiância solar do padrão STC.

As bases de dados utilizadas para esta revisão bibliográfica foram escolhidas conforme a incidência de artigos que tratam do tema de interesse, sendo as bases *IEEE Xplore*, *Scielo*, *Science Direct*, *Scopus*, *Web of Science*, *Google Scholar* e o repositório da CAPES aquelas com maior frequência de publicações no tema. Foram feitas também buscas na BDTD (Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações) com o objetivo de contemplar possíveis publicações brasileiras sobre simuladores solares. Os idiomas escolhidos para busca foram inglês, português e espanhol. A cadeia de caracteres (*string*) escolhida para a realização das buscas, foi definida da maneira mais precisa possível para focar em artigos referentes à construção de simuladores de baixo fluxo e grande área capaz de reproduzir o conteúdo espectral AM1,5, portanto a *string* utilizada foi (“*solar simulator*” AND “*metal halide*”) OR (“*solar simulator*” AND “*xenon*”) OR (“*solar simulator*” AND “*incandescent*”) OR (“*solar simulator*” AND “*halogen*”) OR (“*solar simulator*” AND “*LED*”), seguida

de –“*high flux*”, de modo que fossem excluídos os artigos acerca de simuladores de alto fluxo luminoso. Para a pesquisa realizada no *Science Direct* foi necessário também o acréscimo de –“*perovskite*”, tendo em vista o grande número de publicações na área de desenvolvimento de células de perovskita com o uso de simuladores solares, além disso, excluiu-se também qualquer “*subject area*” relacionado a química cujo foco são estudos de reações termoquímicas.

A partir da pesquisa realizada nas bases de dados com a cadeia de caracteres (*string*) descrita, foi possível a identificação de 1.830 artigos publicados que apresentavam ao menos alguma das palavras-chave concatenadas na *string*. Com o apoio da ferramenta computacional (*software*) StArt, foi possível a identificação de 150 artigos duplicados. Na análise inicial, por meio da leitura dos títulos e dos resumos dos artigos, 1.580 foram rejeitados, restando cem artigos para a etapa seguinte de análise. Na segunda análise, foi realizada a leitura completa dos trabalhos com ênfase para os resultados e para as conclusões, trinta e oito artigos foram selecionados e sessenta e dois descartados. As análises bibliográficas e bibliométricas desenvolvidas foram baseadas nos trinta e oito artigos escolhidos. A seguir, serão apresentados os resultados da revisão bibliográfica e da bibliometria dos artigos selecionados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Antes da apresentação das análises bibliográficas e bibliométricas, serão apresentadas as sínteses de oito artigos selecionados com ênfase nos aspectos construtivos dos simuladores. As oito publicações mais relevantes quanto ao número de citações na área serão analisadas a seguir. Uma relação completa dos artigos selecionados pode ser solicitada aos autores por meio dos endereços de e-mail informados no cabeçalho.

4.1 Descrição dos trabalhos selecionados

No trabalho realizado por Meng *et al.* (2011) foi construído um simulador solar com o uso de 188 lâmpadas de haleto metálico, com 400 W de potência, totalizando uma potência elétrica de 75,2 kW. As lâmpadas foram posicionadas de forma hexagonal entre si com distância de 0,295 m, formando 8 colunas de 13 lâmpadas, mais 7 colunas com 12 lâmpadas divididas em grupos distintos A, B, C e D, com 42, 56, 48 e 42 lâmpadas, respectivamente. A divisão das lâmpadas em grupos considerou que um grupo individual, ou em conjunto com outros, pode promover a variação ampla e exata da irradiância no plano de testes. O principal objetivo desse simulador é reproduzir a atmosfera terrestre a partir de outras variáveis controladas, tais como umidade, velocidade do vento, temperatura, além da irradiância, para desempenhar vários ensaios, de módulos fotovoltaicos à modelos arquitetônicos em pequena escala. Adicionalmente, um sistema de controle para a ligação das lâmpadas e do ângulo de elevação solar foi concebido para simular a variação da irradiância do sol ao longo de um dia. O simulador construído foi validado por meio da ferramenta computacional *TracePro (Lambda Research)* para distância de 2 m entre as lâmpadas e o plano de testes. A diferença entre o valor médio da irradiância simulada e o valor da irradiância medida foi de 3,5%, confirmando o desempenho adequado do simulador na reprodução dos valores esperados para as grandezas físicas. A não-uniformidade do simulador foi classificada como classe A para uma área retangular de 2 m x 1 m no plano de testes e na classe B para uma área de 2 m x 1,5 m. Ambas as medidas foram tomadas à distância de 2 m entre as lâmpadas e o plano de testes. A estabilidade temporal também foi medida, sendo classificada na classe A, com variação máxima de 1,69%. A correspondência espectral das lâmpadas e refletores utilizados foi classificada como classe B. A irradiância média variou conforme a altura das lâmpadas até o plano de testes e a combinação do conjunto de lâmpadas ligadas, registrando-se a variação da irradiância entre 237,3 W/m² e 1.162,9 W/m². Foi realizada a adaptação no simulador de modo a ampliar a área efetiva de testes por meio da instalação de duas chapas de aço inoxidável retangulares nas laterais do simulador de modo diagonal ao plano das lâmpadas, com dimensões de 4,5 m x 0,6 m. Essa adaptação promoveu melhor colimação da luz emitida pelas lâmpadas e ampliou em média 81,6% a área efetiva de testes.

O trabalho desenvolvido por Stuckelberger (2014) utilizou-se de onze tipos de LEDs cobrindo o espectro de radiação com comprimento de onda entre 400 nm e 750 nm, tendo em vista que o principal objetivo deste simulador é realizar testes em células de silício amorfo. Com o intuito de atingir irradiância equivalente a 3 Sóis, foram construídas 4 placas de circuito impresso (PCBs) contendo os 11 LEDs escolhidos. Foram utilizados 44 LEDs distribuídos em uma área total de 18 cm x 18 cm. No simulador construído, cada tipo de LED teve a intensidade controlada individualmente por meio de mudanças no valor da corrente elétrica controlada simultaneamente em todos os LEDs, para permitir o ajuste da irradiância no plano de testes. O controle de temperatura no simulador pôde ser feito tanto para os LEDs quanto para o plano de testes com a utilização de um radiador de alumínio arrefecido com água (*water-cooling*). A irradiância no plano de testes foi ampliada e homogeneizada por meio de folhas refletivas de material não especificado no artigo. Em termos de resultados, o simulador apresentou correspondência espectral A+ para a faixa pretendida de comprimentos de onda entre 400 nm e 750 nm, além disso, os autores citaram que essa mesma faixa foi dividida em faixas menores de 50 nm em alternativa à 100 nm recomendada em norma, havendo alcançado maior exatidão na correspondência do espectro luminoso. Em termos de não-uniformidade, o resultado apresentado pelos autores indicou que o simulador alcançou a classe A para a área de 13 cm x 13 cm e classe B para a área irradiada de 16 cm x 16 cm. Para a instabilidade temporal do simulador, um período de 24h foi avaliado, encontrando correspondência na classe A++++, que, segundo os próprios autores, corresponde a uma classificação 16 vezes melhor que a classe A normatizada, principalmente devido à grande estabilidade da temperatura dos LEDs.

O simulador construído por Linden *et al.* (2014) utilizou de cem Circuitos Integrados de LEDs (CIs de LEDs) construídos em pequenas placas de circuitos impresso (PCBs) de 5 cm x 5 cm, com um arranjo de dez colunas de dez LEDs. Quatro dessas placas foram dispostas em formato quadrado, totalizando 400 CIs de LEDs para compor a fonte luminosa. O principal objetivo desse simulador era testar células fotovoltaicas de silício e células multijunção. Foram selecionados vinte e três tipos de LEDs com comprimentos de onda diferentes, sendo que cada série de LEDs individualmente controlada, era correspondente a um determinado comprimento de onda, produzindo irradiância com espectro na faixa de 400 nm a 1.100 nm. As paredes do simulador foram compostas por espelhos de 10 cm de altura, estabelecendo assim a distância dos LEDs ao plano de testes, de modo que a irradiância emitida pelos LEDs fosse melhor aproveitada. Em termos de operação, o simulador pode ser considerado do tipo pulsado à medida em que uma série de LEDs pode ser programado individualmente para operar durante um dado período variável. Em termos de resultados, o simulador apresentou não-uniformidade classe A para uma área quadrada de 16 cm x 16 cm, e não-uniformidade de aproximadamente 2%. A correspondência espectral, tanto para os blocos de cem LEDs individuais quanto para o conjunto de 400 LEDs, atingiu classe A+ de correspondência espectral na faixa de comprimento de onda entre 400 nm e 1100 nm, com irradiância aproximada de 120 mW/cm². Apesar de a instabilidade temporal não ter sido avaliada, um teste realizado com uma célula solar de 156 mm x 156 mm apresentou valores para a curva I-V em conformidade com o catálogo do fabricante.

No trabalho realizado por Namin *et al.* (2013), foram construídos cinco simuladores com o uso de quatro cores únicas de LEDs associados a uma fonte de luz RGB (combinando vermelho, verde, azul e branco), capaz de emitir alta irradiância quando submetida a um pulso de grande amplitude de tensão. Cada simulador individual era composto por um arranjo de 1024 LEDs, posicionados 3 mm acima de um vidro difusor posicionado a 30 mm do plano de testes. Um sistema com dissipadores de calor e miniventiladores foi utilizado para promover a circulação forçada do ar. Os simuladores construídos foram do tipo pulsados, com pulsos variando entre 0 e 150V e duração de pulsos de 10ms emitidos a cada 1 segundo. Durante o desenvolvimento dos simuladores, foi também realizada uma breve análise no impacto da temperatura na operação pulsada e contínua dos simuladores, indicando que o modo de trabalho pulsado apresentou melhor desempenho, com temperatura de aproximadamente 27°C nos LEDs, enquanto na operação contínua a temperatura dos LEDs do simulador foi de aproximadamente 63°C. Em termos de classificação para os simuladores, a não-uniformidade de irradiância para uma área de 17 cm x 17 cm foi classe B para todos os 5 simuladores, com todos os resultados abaixo dos 5% de não-uniformidade, com a irradiância média variando entre 400 W/m² e 1000 W/m², a depender da cor. A instabilidade temporal também foi classe B para todos os simuladores. Apesar de as correspondências espectrais dos simuladores não terem sido avaliadas, testes para levantamento de curvas I-V foram realizados, com correções dos valores em conformidade com a norma IEC 891, que prevê métodos de correção das curvas características dos módulos para condições fora do padrão STC. Após a correção, as curvas I-V ficaram aproximadamente sobrepostas à curva de referência medida com um simulador solar comercial classe AAA (PASAN *Sun Simulator* IIIc). No mais, os valores característicos da célula utilizada nos testes, determinados a partir de curvas I-V, apresentaram alta correspondência com os valores de referência com diferenças percentuais máximas de 4,1%.

O simulador desenvolvido por Hamadani (2011) utilizou quatro placas com 34 LEDs de alta potência, combinados com guias de luz afunilados. O guia de luz foi elaborado com apoio da ferramenta computacional de rastreamento de luz ZEMAX, tendo como objetivos manter a uniformidade na irradiância dos diversos LEDs e promover uma multiplexação das várias frequências de radiação emitidas pelos LEDs. A partir de resultados de simulação, os autores construíram quatro guias de luz de alumínio com dimensões de 7,6 cm x 7,6 cm na abertura de instalação dos LEDs e 5 metros de comprimento até a saída de luz na extremidade oposta cujas dimensões são de 30,5 cm x 30,5 cm. Os LEDs podiam ser controlados individualmente possibilitando também a operação do simulador na forma pulsada. As classificações do simulador de acordo com a IEC 60904-9 foram avaliadas. Para a correspondência espectral, o simulador foi classificado na classe C, embora tenha alcançado classe A para algumas faixas do espectro. A instabilidade temporal foi classificada na classe A tanto para o modo pulsado quanto para o modo contínuo de operação. A não-uniformidade da irradiância foi testada para dois dos quatro guias de luz, resultando em não-uniformidade na classe C, com uso simultâneo dos dois guias de luz em uma área de 25 cm x 50 cm e medições de irradiâncias realizadas a uma distância de 34 cm da saída.

O simulador desenvolvido por Hussain *et al.* (2011) contou com vinte e três lâmpadas de tungstênio halógenas de 500 W de potência. O objetivo do simulador era testar módulos fotovoltaicos térmicos (PVT – *Photovoltaic Thermal*), com área de testes de 120 cm x 53 cm à distância de 160 cm das luminárias. Apesar de as lâmpadas halógenas utilizadas permitirem o ajuste de intensidade (dimerização), a técnica de variação de irradiância utilizada no simulador foi a de liga-desliga em determinados conjuntos de lâmpadas para ajustar a irradiância. Segundo os autores, essa técnica foi eleita tendo em vista o aumento da vida útil das lâmpadas na medida em que a variação de tensão durante o funcionamento de lâmpadas halógenas a longo prazo podem ocasionar perda de eficiência e dano permanente. Como resultados, o trabalho apresentou não-uniformidade de irradiância de 7,8% no plano de testes para irradiância média máxima de 804 W/m².

No trabalho conduzido por Yandri (2018), foi desenvolvido um simulador solar com lâmpadas halógenas cujo objetivo era ser compacto, de baixo custo, fácil de operar, manusear e transportar, visando aplicações tanto para testes de módulos fotovoltaicos de silício cristalino quanto para coletores de aquecimento solar e híbridos térmico-fotovoltaicos. O simulador foi construído com estrutura de alumínio com dimensões de 430 mm x 490 mm x 1000 mm, com dezesseis lâmpadas halógenas de 50W dispostas em posições fixas de 4 fileiras com 4 lâmpadas. Um diferencial na construção desse simulador foi a instalação das lâmpadas na parte inferior da área de teste. Assim, os módulos testados eram posicionados com as faces coletoras voltadas para baixo. A irradiância foi ajustada por meio da variação da tensão das

lâmpadas. Os autores definiram a distância de 32 cm entre as lâmpadas e o plano de testes como ideal para atingir irradiância média de 800 W/m² e não-uniformidade de irradiância igual a 9,7%.

O simulador desenvolvido por Colarossi *et al.* (2021) foi construído com o uso de 20 lâmpadas de haleta metálico com potência de 360W, distribuídas em uma área de 2,23 m x 1,2 m em 4 fileiras de 5 lâmpadas. Os refletores utilizados foram do tipo parabólicos com material reflexivo em alumínio com capacidade de reflexão de 0,99 no espectro das lâmpadas. Os testes foram realizados em uma área de 2 m x 1 m dividida em uma matriz de 200 pontos para medição dos valores característicos do simulador. O valor maior valor da irradiância encontrada ao longo da área total foi 1.038 W/m² e o menor foi 729 W/m². A área foi dividida em três subáreas com classificações equivalentes para a não-uniformidade de acordo com a IEC 60904-9. A área de 2 m x 0,9 m obteve não-uniformidade classe C para irradiância média de 993 W/m²; a área de 1,70 m x 0,80 m foi classe B para irradiância média de 995 W/m² e a área de 0,8 m x 0,4 m foi classificada como A para irradiância média de 1.017 W/m². A instabilidade temporal do simulador alcançou a classe A. Foram ainda realizados testes com um módulo fotovoltaico de 40 Wp no simulador, indicando que tanto a curva I-V gerada no simulador quanto a curva obtida por simulação numérica e por testes de campo (*outdoor*) foram equivalentes.

4.2 Análise Bibliométrica

Considerando os estudos realizados segundo a metodologia descrita no item 3, foram selecionados trinta e oito trabalhos de simuladores solares que apresentaram as características selecionadas. A análise bibliométrica baseou-se nos trinta e oito trabalhos selecionados indicando os artigos mais citados, a número de publicações por ano e por tipo de lâmpada e o número de publicações de acordo com o país de origem da instituição dos autores.

A Tab. 2 resume os dez artigos mais citados, de acordo com duas das bases de dados analisadas, *Clarivate Analytics (Web of Science)* e *Google Scholar*, a partir de busca direta de artigos nas bases de dados. Os valores nulos referentes às citações na base *Clarivate Analytics* indicam que não há citações ao artigo na busca.

Tabela 2 – Tabela com os dez artigos selecionados mais citados de acordo com duas bases de dados.

| Autores | Título do Artigo | Citações | |
|--|---|---------------------|----------------|
| | | Clarivate Analytics | Google Scholar |
| Meng, Q.; Wang, Y.; Zhang, L. | Irradiance characteristics and optimization design of a large-scale solar simulator | 66 | 104 |
| Stuckelberger, M.; Perruche, B.; Bonnet-Eymard, M.; Riesen, Y.; Despeisse, M.; Haug, F.-J.; Ballif, C. | Class AAA LED-based solar simulator for steady-state measurements and light soaking | 30 | 60 |
| Linden, K.J.; Neal, W.R.; Serreze, H.B. | Adjustable spectrum LED solar simulator | 14 | 39 |
| Namin, A.; Jivacate, C.; Chenvidhya, D.; Kirtikara, K.; Thongpron, J. | Determination of solar cell electrical parameters and resistances using color and white LED-based solar simulators with high amplitude pulse input voltages | 0 | 43 |
| Hamadani, B. H.; Chua, K.; Roller, J.; Bennahmias, M. J.; Campbell, B.; Yoon, H. W.; Dougherty, B. | Towards realization of a large-area light-emitting diode-based solar simulator | 0 | 38 |
| Hussain, F.; Othman, M. Y. H.; Yatim, B.; Ruslan, H.; Sopian, K.; Anuar, Z.; Khairuddin, S. | Fabrication and Irradiance Mapping of a Low-Cost Solar Simulator for Indoor Testing of Solar Collector | 0 | 31 |
| Irwan, Y.M.; Leow, W.Z.; Irwanto, M.; Fareq, M.; Amelia, A.R.; Gomesh, N.; Safwati, I. | Analysis air cooling mechanism for photovoltaic panel by solar simulator | 0 | 30 |
| Yandri, E. | Uniformity characteristic and calibration of simple low-cost compact halogen solar simulator for indoor experiments | 0 | 28 |
| Colarossi, D; Tagliolini, E.; Principi, P.; Fioretti, R. | Design and Validation of an Adjustable Large-Scale Solar Simulator | 8 | 17 |
| Moria, H.; Mohamad, T. I; Aldawi, F. | Radiation distribution uniformization by optimized halogen lamps arrangement for a solar simulator | 0 | 21 |

A Fig. 1 apresenta o número de publicações por ano. Apesar de o levantamento de artigos ter sido delimitado para os últimos vinte anos, a contagem no gráfico se inicia somente em 2011, ano de ocorrência dos primeiros artigos de simuladores com as características buscadas. A partir de então, houve o aumento gradual do número de publicações sobre simuladores com grandes áreas e baixo fluxo.

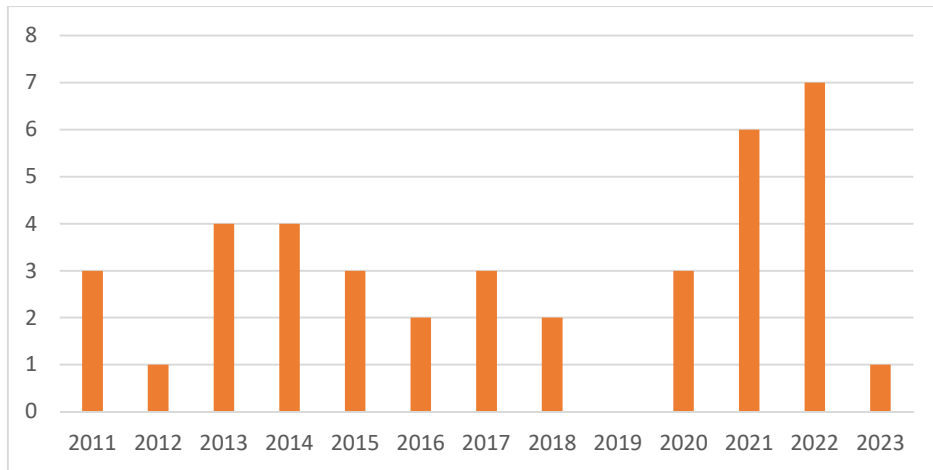


Figura 1 – Distribuição temporal das publicações.

A Fig. 2 ilustra o número de publicações sobre simuladores de grande área e baixo fluxo de acordo com o país de origem da instituição dos autores. O Brasil aparece em segundo lugar com cinco publicações. Há doze publicações feitas por autores de instituições de países asiáticos (Tailândia, Malásia e Indonésia), apontando o predomínio de autores de instituições asiáticas em trabalhos publicados sobre simuladores de grande área e baixo fluxo.



Figura 2 – Número de publicações de acordo com o país de origem da instituição dos autores.

A Fig. 3 ilustra a relação dos tipos de lâmpadas dentre os trinta e oito trabalhos selecionados. A maioria das publicações foi baseada em lâmpadas halogenadas, provavelmente pelo baixo custo e praticidade na instalação, que dispensa o uso de reatores ou fontes retificadoras. Na segunda posição estão os artigos baseados em simuladores com lâmpadas de LED como fonte de irradiância, que deve ainda ser uma tecnologia a ser muito explorada principalmente para simuladores solares de grandes áreas. Os simuladores com lâmpadas de haleto metálico tiveram quase o mesmo número de publicações que os simuladores a LED, certamente por se tratar de uma tecnologia já consolidada e com grande potência de irradiância. Os simuladores com lâmpadas de xenônio apresentaram o menor número de publicações, embora se trate de uma fonte de irradiância de alta potência e boa correspondência espectral, amplamente utilizada em simuladores solares comerciais, o alto custo e a curta vida útil restringem sua aplicação.

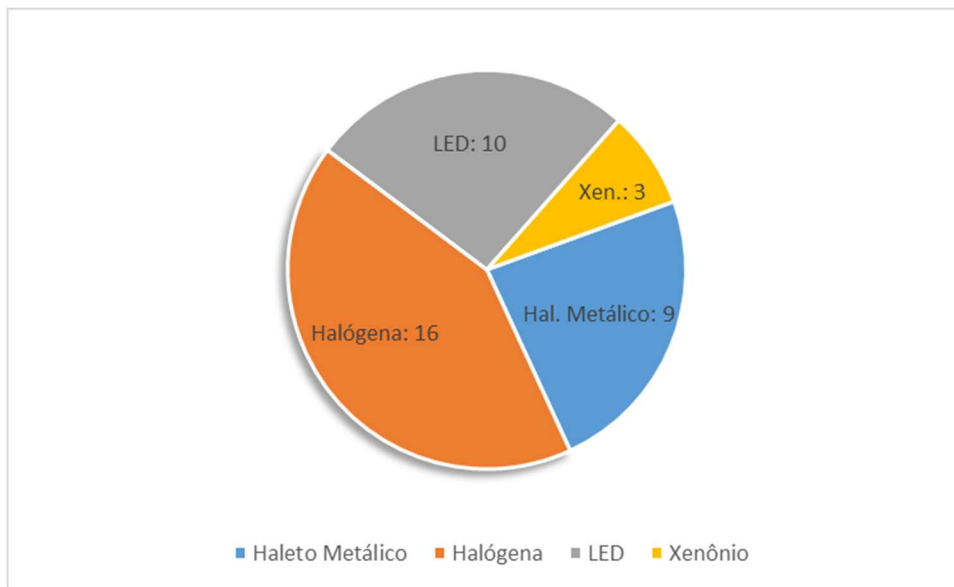


Figura 3 – Número de publicações por tipo de lâmpada utilizada.

5. CONCLUSÃO

Este texto apresentou a revisão sistemática da literatura sobre simuladores solares fotovoltaicos de grandes áreas e baixo fluxo de irradiância. Apesar de não haver pleno consenso na literatura, no escopo desta revisão foram estabelecidos como simuladores de “grande área” aqueles com área de testes maiores que uma célula fotovoltaica comercial ($\approx 256 \text{ cm}^2$), e como simuladores de “baixo fluxo” aqueles com irradiância aproximada de 1.000 W/m^2 . Trinta e oito trabalhos foram selecionados e os oito artigos mais citados de acordo com a revisão foram sintetizados no texto.

Os oito simuladores solares apresentados na análise da bibliografia, apesar de não contemplar todos os trabalhos selecionados, demonstram a amplitude da variedade de abordagens e das características dos simuladores. O simulador de Meng *et al.* (2011) destaca-se pela alta potência e pela adaptação feita com chapas de aço retangulares nas laterais, que ampliou significativamente a área efetiva de testes, dando versatilidade nos ensaios em módulos fotovoltaicos. O simulador de Stuckelberger (2014), focado em testes em células de silício amorfo, apresentou boa exatidão na correspondência espectral e resultados altamente coincidentes com padrões das normas, com destaque para a instabilidade temporal que alcançou exatidão dezesseis vezes maior que a melhor classificação estipulada em norma, principalmente devido às fontes dos LEDs e ao controle de temperatura, indicando que a temperatura é um fator de relevância nos simuladores. O simulador de Linden *et al.* (2014) alcançou o controle do espectro de irradiância com boa exatidão com a utilização de CIs de LEDs, destacando-se a não-uniformidade classe A, além do uso de espelhos na câmara interna do simulador para melhora da irradiância incidente no plano de testes. Namin *et al.* (2013) desenvolveu simuladores pulsados com LEDs, demonstrando resultados corrigidos comparáveis a simuladores solares comerciais e melhor controle térmico no modo pulsado. O simulador de Hamadani *et al.* (2011) utilizou guias de luz afunilados de alumínio para atingir estabilidade temporal classe A e não-uniformidade de irradiância classe C. Hussain *et al.* (2011) optou por lâmpadas halógenas e controle liga-desliga no simulador alcançando não-uniformidade de 7,8%. Yandri (2018) optou por uma geometria incomum ao posicionar as lâmpadas na parte inferior da área de teste e obteve os melhores resultados para distância de 32 cm entre as lâmpadas e o plano de testes. Colarossi *et al.* (2021) empregou lâmpadas de haleto metálico e refletores parabólicos e atingiu irradiância média de 1.038 W/m^2 com não-uniformidade classe A em partes da área de testes, além de apresentar estabilidade temporal classe A.

Os simuladores analisados neste trabalho, conforme o recorte temporal de vinte anos, trouxeram os principais aspectos da tecnologia de simuladores solares, evidenciando grande diversidade de técnicas e de aplicações. Os principais fatores que caracterizam a qualidade na construção de um simulador solar são a geometria adequada, a distribuição homogênea das fontes de irradiância, adaptações que ampliem a área efetiva de testes e reduza as não-uniformidades, exatidão na correspondência espectral e controle térmico adequado. Ademais, o uso de ferramentas computacionais (*softwares*) de simulações ópticas para o dimensionamento, escolha da geometria e das fontes de radiação luminosa podem aprimorar o projeto e a construção dos simuladores solares. Pode-se afirmar que os simuladores se destacam individualmente por características específicas, sendo que cada aplicação apresenta exigências inerentes.

A escolha do simulador adequado é determinada pelos recursos exigidos por cada aplicação específica, tais como valor máximo de irradiância no plano de testes, controle de variação da irradiância, exatidão, estabilidade temporal e correspondência espectral. À medida em que a tecnologia solar avança, a evolução dos simuladores solares pode contribuir fornecendo ferramentas para que a indústria de energia solar possa avaliar produtos durante o desenvolvimento, durante o processo de produção, testes de desempenho, estimativa de ciclo de vida e testes de degradação acelerada.

Agradecimentos

Este trabalho conta com o apoio financeiro do Projeto de P&D registrado na ANEEL sob número PD-08554-0001/2020 no âmbito da Lei no 9.991 de 24/07/2000, com recursos das Concessionárias de Transmissão de Energia Elétrica Pantanal Transmissão S/A, Caldas Novas Transmissão S/A, Firminópolis Transmissão S/A, Transenergia Goiás S/A, Lago Azul Transmissão S/A. À CAPES pela concessão de bolsa de mestrado.

REFERÊNCIAS

- Al-Ahmad, A. Y. T., 2019. Design and Construction of a Novel Large Area LED Solar Simulator for Photovoltaic Cell Characterization, Ph.D. Thesis, University of Newcastle, Australia.
- Colarossi, D.; Tagliolini, E.; Principi, P.; Fioretti, R., 2021. Design and Validation of an Adjustable Large-Scale Solar Simulator, *Applied Science*, vol. 11, n. 04, pp. 1-13.
- Costa, E. R., Oliveira, F. S., Krenzinger, A., 2018. Desenvolvimento de Simulador Solar para Exposição Contínua de Módulos Fotovoltaicos, VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, Gramado.
- Ekman, B. M.; Brooks, G.; Rhamdhani, M. A., 2015. Development of high flux solar simulators for solar thermal research, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol. 141, pp. 436-446.
- Hamadani, B. H.; Chua, K.; Roller, J.; Bennahmias, M. J.; Campbell, B.; Yoon, H. W.; Dougherty, B., 2011. Towards realization of a large-area light-emitting diode-based solar simulator *Progress in Photovoltaics*, vol. 21, n. 04, pp. 779-789.
- Hussain, F; Othman, M. Y. H.; Yatim, B.; Ruslan, H.; Sopian, K.; Anuar, Z.; Khairuddin, S., 2011. Fabrication and Irradiance Mapping of a Low-Cost Solar Simulator for Indoor Testing of Solar Collector, *Solar Energy Engineering*, vol. 133, n. 04, pp. 044502-044506.
- IEC 60904-9; Photovoltaic devices – Part 9: Solar Simulator performance requirements; Edition 2.0; International Electrotechnical Commission; 2007.
- Innocente, P. R.; Boniatti, V., 2020. Construção de um simulador solar (Construction of a solar simulator). *Brazilian Journal of Development*, vol. 6, n. 2, pp. 7217–7227.
- Linden, K. J.; Neal, W. R.; Serreze, H., 2014. Adjustable Spectrum LED Solar Simulator, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) 9003, San Francisco, USA.
- Meng, Q.; Wang, Y.; Zhang, L., 2011. Irradiance characteristics and optimization design of a large-scale solar simulator, *Solar Energy*, vol. 85, pp. 1758-1767.
- Namin, A.; Jivacate, C.; Chenvidhya, D.; Kirtikara, K.; Thongpron, J., 2013. Determination of Solar Cell Electrical Parameters and Resistances Using Color and White LED-Based Solar Simulators with High Amplitude pulse Input Voltages, *Renewable Energy*, vol. 54, pp. 131-137.
- Pei, Y., 2017. Design of an LED-Based Solar Simulator, Majoring Thesis, Murdoch University, Western Australia.
- Salam, R. A.; Saputra, C.; Yuliza, E.; Meilano, I.; Munir, M. M.; Latief, H.; Khairurrijal, 2016. Development of a Simple Low-Scale Solar Simulator and its Light Distribution, *International Conference on Instrumentation, Control and Automation*, Bandung, Indonesia.
- Stuckelberger, M.; Perruche, B.; Bonnet-Eymard, M.; Riesen, Y.; Despeisse, M.; Haug, Franz-J.; Ballif, C., 2014. Class AAA LED-Based Solar Simulator for Steady-State Measurements and Light Soaking, *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 4, n. 05, pp. 1282-1287.
- Watjanatepin, N.; Sritanauthaikorn, P., 2021. Large Scale LED-Modular-Based Solar Simulator and Calibration Method for PV-Module Characterization, *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, vol. 48, n. 9, pp. 474-484.
- Yandri, E., 2018, Uniformity Characteristic and Calibration of Simple Low-Cost Compact Halogen Solar Simulator for Indoor Experiments, *International Journal of Low-Carbon Technologies*, vol. 13, n. 03, pp. 218-230.

SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW ON SOLAR SIMULATORS FOR APPLICATIONS IN PHOTOVOLTAIC ENERGY

Abstract. *This text addresses a systematic literature review (SLR) conducted with the assistance of the StArt software, focusing on solar simulator technology with large areas (greater than 256 cm²) and non-concentrated flux (around 1,000 W/m²) over the past twenty years. The searched solar simulators were exclusively those using lamps as the irradiance source, including xenon, halogen, metal halide, and LEDs. The SLR searches were conducted on databases such as IEEE Xplore, Scielo, Science Direct, Scopus, Web of Science, Google Scholar, and the CAPES repository. For Brazilian publications, searches were also performed in the BDTD (Brazilian Digital Library of Theses and Dissertations). As a result of the SLR, thirty-eight articles complying with the search criteria were identified. A bibliometric analysis was then conducted, presenting the ten most cited articles, the distribution of the publications over the years, the number of publications according to the country of origin of the author's institutions, and the number of articles classified according to the types of light sources. Eight of the most cited articles in the literature selected by the SLR were briefly summarized highlighting relevant aspects related to the design of solar simulators. These aspects include the importance of choosing an appropriate irradiance source, the impact of geometry on the simulator construction and the lamp distribution on the irradiance plane, the importance of temperature control for the irradiance source, strategies for optimizing irradiance in the internal chamber using reflective materials, the use of optical simulation software for constructive optimization of the simulator, and the classification of the simulators according to the international standards for solar simulator performance.*

Keywords: *Solar Simulator, Systematic Literature Review, Solar Photovoltaic Energy.*